

Qualité des eaux de trois bras morts de la Garonne (variabilité spatio-temporelle) Water quality in three ancient alcors of the river Garonne : spatio-temporal variability

D. Bengeni, P. Lim et A. Belaud

Volume 5, numéro 2, 1992

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/705125ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/705125ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

0992-7158 (imprimé)

1718-8598 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Bengeni, D., Lim, P. & Belaud, A. (1992). Qualité des eaux de trois bras morts de la Garonne (variabilité spatio-temporelle). *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 5(2), 131–156. <https://doi.org/10.7202/705125ar>

Résumé de l'article

Pendant deux années, des mesures et analyses d'eau ont été faites mensuellement sur une station de la Garonne et sur trois bras morts différant par leur communication avec le fleuve. La variabilité spatio-temporelle a été dressée à partir de 14 variables physico-chimiques susceptibles d'influer les équilibres chimiques de l'eau et la vie aquatique. Les données ont fait l'objet d'une Analyse en Composantes principales précédée par une analyse de variance entre saisons et entre stations de mesures afin de déterminer l'importance des hétérogénéités spatiale et temporelle des données.

L'eau du fleuve est soumise à un cycle climatique annuel de température et de débit. De brèves fortes eaux de printemps alternent avec de longues périodes de débits stables et inférieurs aux moyennes établies sur plusieurs décennies. Par rapport aux charges de sulfates et de chlorures prises comme référence du drainage du bassin versant, les flux de nitrates ont un pic accentué au printemps, résultant des activités agricoles. Les phosphates présentent aussi un accroissement automnal qui pourrait traduire un cycle annuel de minéralisation-déminéralisation. Les matières organiques s'élèvent en rapport au taux de chlorophylle *a*. L'eau de Garonne est de bonne qualité et conforme à la typologie habituelle, hormis des taux déclassants d'ammoniaque provenant de l'agglomération toulousaine et dont l'autoépuration est souvent incomplète. Par rapport à la Garonne, les trois bras morts sont caractérisés par un cycle thermique accentué en été. Mise en évidence par l'ACP, la minéralisation des eaux de ces trois bras morts évolue selon un cycle saisonnier parallèlement aux fluctuations de débit de la Garonne. Elle indique un gradient de minéralisation croissante de l'hiver au printemps. La qualité de l'eau lors des fortes eaux printanières est homogénéisée et imposée par le fleuve. En phases de faibles débits, la qualité de l'eau évolue parallèlement à celle de la Garonne (concentrations des substances) pour un bras mort ventilé par une communication amont et aval. En revanche, les deux bras morts en simple communication aval présentent un retard à la concentration de l'eau d'autant plus évident que la communication est étroite. Les substances fertilisantes (nitrates, phosphates, ...) augmentant de l'amont vers l'aval dans ces deux derniers bras morts, sont en été en concentration inférieure par rapport au fleuve, en raison : 1) du remplissage printanier par des eaux diluées, puis du retard estival à l'équilibrage par simple communication aval et 2) de la consommation par les organismes végétaux aquatiques. L'étude des différences spatio-temporelles met ainsi en évidence un gradient saisonnier de minéralisation, un gradient aval-amont de productivité et un gradient aval-amont de réchauffement estival. La productivité apparaît donc liée au réchauffement estival plutôt qu'à la minéralisation ou aux teneurs en substances fertilisantes.

Qualité des eaux de trois bras morts de la Garonne : variabilité spatio-temporelle

Water quality in three ancient arms
of the river Garonne :
spatio-temporal variability

D. BENGEN¹, P. LIM¹, A. BELAUD¹

Reçu le 30 janvier 1991, accepté pour publication le 3 octobre 1991*.

SUMMARY

For two years, water analysis and measurements were carried out monthly at one station on the Garonne and at three different ancient arms. Spatio-temporal variability was drawn up from 14 physical and chemical properties (water temperature, pH, electrical conductivity, oxygen, oxydability, total alkalinity, ammonia, nitrate, orthophosphate, sulphate, chloride, calcium, magnesium and chlorophyll a) which can have an effect upon the chemical balance of water and upon aquatic life. The data were studied by Principal Component Analysis preceded by Analysis of Variance between date and between station in order to determine the significance of spatio-temporal heterogeneity.

The river water is under the influence of an annual climatic cycle affecting temperature and flow. The flash floods in spring alternate with long periods of flow stability (these periods are lower than the established means for the flow over the last few decades). For each element specific water discharge-concentration relationships can be drawn, which may present time variations according to the hydrological regime. The particulate and dissolved soil-derived components increase with water discharge, whereas groundwater-derived elements are generally diluted during floods. In relation to the sulphate and chloride loads, which are used as a reference for the drainage of the basin, the nitrate levels have an accentuated peak in spring resulting from agricultural practices. Phosphates also display a high autumn level which could be due to an annual cycle of mineralisation-demineralisation. Organic matter increases correlatively with the chlorophyll a rate. The water in the Garonne is of a high quality conforming to the standards expected for this type, except for the ammonia levels which come from the Toulouse agglomeration, and mean that the self cleaning process in this case is often incomplete. In relation to the Garonne, the three ancient arms have thermal cycle which characteristically accentuated in the summer. Water temperature, electrical conductivity and pH value were not so varied from one to another

1. Laboratoire d'Ichtyologie Appliquée, ENSA Toulouse, 145, avenue de Muret, 31076 Toulouse cedex, France.

* Les commentaires seront reçus jusqu'au 30 décembre 1992.

ancient arms. This spatial homogeneity was coupled with the temporal homogeneity for the pH value. In the other hand, water temperature and electrical conductivity followed the different seasonal cycle. The temperature variations are parallel in all of the stations, but the amplitude of summer-winter cycle is important in three ancient arms. Within the ancient arms, the longitudinal profile of temperature was similar in summer, characterized by a little warming up according to the downstream-upstream gradient presented in Principal Component Analysis (PCP). This gradient was more pronounced in the ancient arms PV and GF than in ancient arm RB where subsists in summer a weak circulation of river flow.

The temperature presents a determinant role in the ancient arm productivity, reflected by the significant correlations between temperature on the one hand and, the organic matter contents, chlorophyll a and pH values on the other hand. The increase of temperature in summer is accompanied by the production of organic matter, particularly in the upstream part of PV and GF. This phenomenon could be explained as a result of biological activity growth essentially phytoplankton because it was attached to an increase of chlorophyll a concentration. The biological activity stimulated by the increasing temperature contributes to reduce the pH value, accentuated by the diminution of oxygen saturation vigorously indicated in the morning, at the upstream part of the ancient arms. The percentage of oxygen saturation in the morning was essentially modified by the biological activity. It is stable and high during the spring period which corresponds to high water level of the river Garonne. Outwards this period where the river imposed the oxygen rate closely related to the air saturation, an upstream-downstream gradient occurred in the weak water level periods (summer and winter). This is particularly indicated in the ancient arms which have not an upstream communication with the river. In this lentic ecosystem, it appears that the oxygen rate depends to the flora and fauna metabolic activity, confirmed by a highly significant correlation between the chlorophyll a concentration and the oxygen rate measured in the morning. The persistence of weak renewal water by the upstream part of ancient arm RB limited the summer warming up in this ancient arm compared to PV and GF. Thus, the productivity associated, evaluated by the chlorophyll a concentration, organic matter contents and the variations of pH and oxygen values are lower than the two fast ancient arms where have only the downstream outlet.

The conductivity value in the ancient arms is closely allied to the river Garonne. It constitutes a first evidence to show that the water quality in the ancient arms was affected by the river. In spring, the regular re-covering of the ancient arms by the river water diluted induces an annual drop of conductivity.

Dressing by Principal Component Analysis, the mineral content in these three ancient arms shows a seasonal cycle which corresponds to the flow fluctuations of the river Garonne. The winter-spring gradient was indicated. This gradient was more evident for magnesium than for sulphate, chloride and calcium. The high spring water level reflected a low concentration of sulphate, chloride, calcium and magnesium due to water dilution. The water quality at this period is homogeneous because of the influence of the Garonne. When the water demands is weak, the quality of water in one of the ancient arms evolves parallel with that in the Garonne (concentration of matter) as it is alimented both up and downstream by the Garonne. On the other hand, the other two ancient arms have only the downstream outlet causing a delay in water concentration, especially as the connection with the main stream is narrow. The fertilising matter (nitrates, phosphates, etc.) which increases downstream, in summer, is at lower concentration in the ancient arms compared to the main stream for the following reasons : 1) filling of the spring influx by diluted water, then the summer delay in equilibration of water via the single downstream inlet

and 2) due to the absorption by the aquatic plants. Finally, the different spatio-temporal studies exhibit a seasonal mineralisation gradient, a downstream-upstream productivity gradient and a downstream-upstream summer warming. The productivity therefore appears to be related to the summer warming rather than to the mineralisation process or the presence of fertilising constituents.

Key-words : *Garonne, ancient arms, water quality, spatio-temporal, variability analysis of variance, principal component analysis.*

RÉSUMÉ

Pendant deux années, des mesures et analyses d'eau ont été faites mensuellement sur une station de la Garonne et sur trois bras morts différant par leur communication avec le fleuve. La variabilité spatio-temporelle a été dressée à partir de 14 variables physico-chimiques susceptibles d'influer les équilibres chimiques de l'eau et la vie aquatique. Les données ont fait l'objet d'une Analyse en Composantes principales précédée par une analyse de variance entre saisons et entre stations de mesures afin de déterminer l'importance des hétérogénéités spatiale et temporelle des données.

L'eau du fleuve est soumise à un cycle climatique annuel de température et de débit. De brèves fortes eaux de printemps alternent avec de longues périodes de débits stables et inférieurs aux moyennes établies sur plusieurs décennies. Par rapport aux charges de sulfates et de chlorures prises comme référence du drainage du bassin versant, les flux de nitrates ont un pic accentué au printemps, résultant des activités agricoles. Les phosphates présentent aussi un accroissement automnal qui pourrait traduire un cycle annuel de minéralisation-déminéralisation. Les matières organiques s'élèvent en rapport au taux de chlorophylle *a*. L'eau de Garonne est de bonne qualité et conforme à la typologie habituelle, hormis des taux déclassants d'ammoniaque provenant de l'agglomération toulousaine et dont l'autoépuration est souvent incomplète. Par rapport à la Garonne, les trois bras morts sont caractérisés par un cycle thermique accentué en été. Mise en évidence par l'ACP, la minéralisation des eaux de ces trois bras morts évolue selon un cycle saisonnier parallèlement aux fluctuations de débit de la Garonne. Elle indique un gradient de minéralisation croissante de l'hiver au printemps. La qualité de l'eau lors des fortes eaux printanières est homogénéisée et imposée par le fleuve. En phases de faibles débits, la qualité de l'eau évolue parallèlement à celle de la Garonne (concentrations des substances) pour un bras mort ventilé par une communication amont et aval. En revanche, les deux bras morts en simple communication aval présentent un retard à la concentration de l'eau d'autant plus évident que la communication est étroite. Les substances fertilisantes (nitrates, phosphates, ...) augmentant de l'amont vers l'aval dans ces deux derniers bras morts, sont en été en concentration inférieure par rapport au fleuve, en raison : 1) du remplissage printanier par des eaux diluées, puis du retard estival à l'équilibrage par simple communication aval et 2) de la consommation par les organismes végétaux aquatiques. L'étude des différences spatio-temporelles met ainsi en évidence un gradient saisonnier de minéralisation, un gradient aval-amont de productivité et un gradient aval-amont de réchauffement estival. La productivité apparaît donc liée au réchauffement estival plutôt qu'à la minéralisation ou aux teneurs en substances fertilisantes.

Mots clés : *Garonne, bras morts, qualité des eaux, variabilité spatio temporelle, analyse de variance, analyse en composantes principales.*

INTRODUCTION

A partir d'une histoire géomorphologique, les principales caractéristiques de la dynamique fluviale (pente, charge, débit) se combinent pour générer localement des trains de méandres ou des chenaux multiples (bras de tressage ou d'anastomose) propices au recoupement et à l'abandon de chenaux par le cours actif. Ces chenaux abandonnés, appelés « bras morts », évoluent dans le temps depuis leur isolement jusqu'à des stades semi-aquatiques, à moins qu'ils ne soient empruntés de nouveau et donc « rajeunis » par le fleuve à la faveur d'une divagation (CASTELLA, 1987). Depuis le XIX^e siècle, des chenaux annexes ont souvent été coupés artificiellement.

L'intérêt écologique de ces bras morts des fleuves, notamment pour les populations piscicoles (abris des crues et des pollutions, nurseries, ...) a été reconnu lors d'études effectuées sur le Rhône (JUGET *et al.*, 1976 ; JUGET et ROUX, 1982 ; COPP, 1987).

La Garonne en aval de Toulouse et jusqu'à la confluence du Tarn présente un lit instable, aux méandres très mobiles, ce qui a facilité la création de nombreux bras morts dans une vallée qui s'élargit de 1 à 4 km (FORTUNE, 1988). Cette portion est peu aménagée, et a bénéficié d'une relative conservation des milieux riverains, favorisant l'équilibre des écosystèmes. La principale agression subie par ce tronçon de la Garonne est l'abaissement du lit atteignant parfois 1,5 mètre, consécutif à l'extraction de matériaux dont le renouvellement par l'amont est interrompu par les barrages (BEAUDELIN, 1987). Cet abaissement rapide du lit a accéléré le vieillissement des bras morts et limité à une dizaine ceux qui restent encore en eau toute l'année.

Alors qu'il a été décrit la typologie et le fonctionnement écologique des bras morts du Haut-Rhône (CASTELLA et AMOROS, 1984 ; AMOROS et CHESSEL, 1985 ; JACQUET-LABROT, 1986 ; CARREL et JUGET, 1987), aucune étude n'avait encore été entreprise sur les bras morts de la Garonne.

Cet article qui concerne des bras morts d'âge biologique différents, a pour buts :

- de connaître les variations spatiales et surtout temporelles des caractéristiques physico-chimiques de l'eau des bras morts de la Garonne ;
- d'en déduire les mécanismes et, en particulier, l'influence de la dynamique fluviale sur la qualité de l'eau des bras morts.

La présente contribution s'inscrit dans une plus vaste recherche qui vise à évaluer les apports des bras morts pour le déroulement des processus biologiques intéressant les poissons (BELAUD *et al.*, 1989 et 1990).

MATÉRIEL ET MÉTHODES

1. Sites étudiés

Les sites d'étude de la qualité physico-chimique de l'eau, sont situés dans le département de la Haute-Garonne en aval de Toulouse. Trois bras morts, dont le degré de communication avec le fleuve diffère, et une station de la Garonne ont été choisis dans ce secteur s'étendant sur une distance de 6 km. Ces sites retenus, d'amont vers l'aval, sont représentés dans la *figure 1*. Ils sont désignés par le lieu-dit et l'agglomération la plus proche. Ce sont les sites :

- Ramier de Bigorre (Seilh), désigné par l'abréviation « RB » : stations 1 (amont) et 2 (aval),
- Port-Vieux (St. Caprais) (« PV » : stations 3 (amont) et 4 (aval),
- Grenade-Fontaine (Grenade) (« GF ») : stations 5 (amont) et 6 (aval),
- Garonne entre PV et GF : station 7.

Les bras morts RB et PV ont été réaménagés (en 1986 et 1985 respectivement) dans l'intention de favoriser le refuge des poissons. Ils sont relativement peu profonds, peu larges et à substrat grossier (graviers/galets). Le bras mort RB ouvert tant en amont qu'en aval, est plus long que le bras mort PV seulement ouvert en aval. Le bras mort GF, également peu profond mais à granulométrie plus fine (vase/gravier), résulte de l'abandon par la Garonne de ce chenal au cours de sa divagation naturelle. Quelques caractéristiques topographiques de trois bras morts étudiés sont indiquées dans le *tableau 1*.

Tableau 1 Résumé des caractéristiques topographiques de trois bras morts étudiés.

Table 1 *Topographical characteristics of three ancient arms of the river Garonne.*

Caractéristiques	RB	PV	GF
Point kilométrique (1)	693	697	698
Naturel	non	non	oui
Recreusé artificiellement	oui	oui	non
Longueur (m)	725	364	437
Largeur moyenne (m)	9,2	15	32
Profondeur moyenne (m) (2)	1,2	1,7	1,5
Superficie (m ²)	3 750	5 000	12 500
Communication avec le fleuve			
amont	oui	non	non
aval	oui	oui	oui
Reste en eau en condition de sécheresse 1989 et 1990	oui	oui	oui

(1) par rapport à la position de référence du pont de Bordeaux.

(2) établie pour un débit de la Garonne de 170 m³/s en aval de Toulouse.

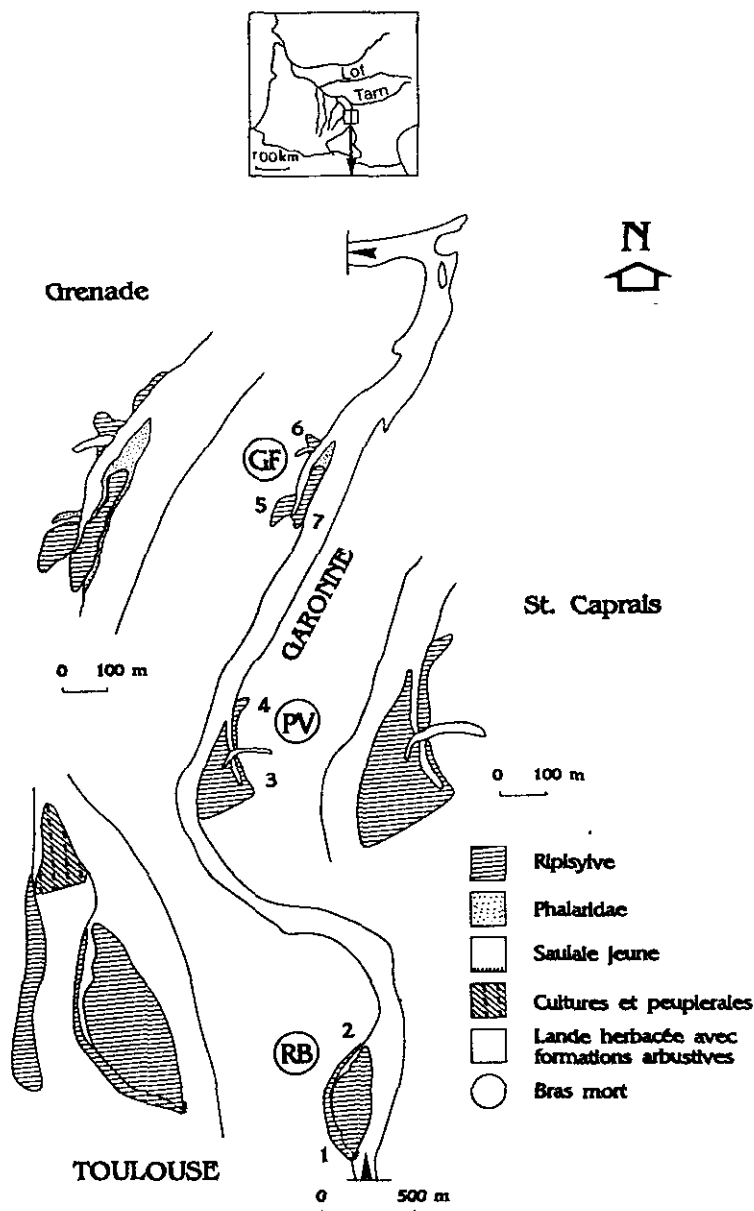


Figure 1 Schéma des bras morts étudiés et emplacements des stations de prélèvement (signalés par un chiffre).

View of ancient arms of the river Garonne with indication of the sampling stations (indicated by a number).

2. Paramètres mesurés

Les prélèvements relatifs à cette étude ont été effectués mensuellement à 24 reprises de mai 1988 à avril 1990. Les sept stations retenues ont été échantillonnées en surface (10 à 30 cm) entre 8 h et 9 h GMT pour déterminer les 14 grandeurs physico-chimiques indiqués dans le tableau 2.

Tableau 2 Variables physico-chimiques étudiées et méthodes de mesure utilisées.

Table 2 Parameters of physical and chemical waters analysed and methods of analysis.

Paramètres	Unités	Méthodes
Température de l'eau	°C	Thermomètre de type USI modèle 58.
Conductivité	µS/cm	Conductimètre de type OSI modèle L17.
pH		pH-mètre de type portetest modèle 901 Knick.
Alcalinité total (TAC)	mg/l	Volumétrie : titrage acide jusqu'à pH 4,3.
Oxygène dissous	% saturation	Oxymètre de type YSI modèle 58.
Oxydabilité	mg/l	Volumétrie : oxydation en milieu acide, à froid pendant 4 h par le permanganate de potassium
Ammonium (N - NH ₄ ⁺)	mg/l	Colorimétrie : formation en milieu alcalin d'un composé de type Indophénol.
Nitrates (N - NO ₃ ⁻)	mg/l	Colorimétrie : réduction de nitrates-nitrites sur colonne cadmium. Réaction de diazotation des nitrites avec la sulfanilamide.
Orthophosphates (PO ₄ ³⁻)	mg/l	Colorimétrie : formation d'un complexe avec molybdate d'ammonium
Sulfates (SO ₄ ²⁻)	mg/l	Colorimétrie : flux continu. Formation d'un complexe en présence du bleu de méthylthymol en solution alcoolique.
Chlorures (Cl ⁻)	mg/l	Colorimétrie : flux continu. Formation d'un complexe jaune avec le thiocyanate mercurique.
Calcium (Ca ⁺⁺)	mg/l	Volumétrie : complexométrie à l'EDTA avec la murexide.
Magnésium (Mg ⁺⁺)	mg/l	Calculé à partir de la dureté totale et de la teneur en calcium.
Chlorophylle a	µg/l	Spectrophotométrie : filtration sur Whatman GF/C et extraction à l'acétone 90 % (Méthode de Marker <i>et al.</i> , 1980).

3. Analyse statistique

La mise en évidence des différences spatio-temporelles des descripteurs physico-chimiques mesurés pour chaque station à des dates différentes, nécessite l'utilisation d'une analyse multivariée.

Dans un premier temps, les données physico-chimiques recueillies ont donné lieu à des analyses de variance (SNEDECOR et COCHRAN, 1980 ; ZAR, 1984) entre saisons et entre stations de mesure, afin de déterminer l'importance des hétérogénéités spatiale et temporelle des données.

Au vu de ces résultats préalables et compte tenu de l'indépendance des observations, les données physico-chimiques ont ensuite pu être traitées par Analyse en Composantes Principales (ACP) normées (LEBART *et al.*, 1979 ;

LEGENDTRE et LEGENDRE, 1979 ; FOUART, 1985 ; DIGBY et KEMPTON, 1987 ; JAMBU, 1989). Cette méthode avait déjà été appliquée à des caractéristiques physico-chimiques des eaux continentales par DECAMPS *et al.*, 1976 ; PEGAZ-MAUCET, 1980 ; CARREL, 1986 ; CARREL *et al.*, 1986 ; BOET, 1987 ; VESPINI *et al.*, 1987.

Ce type d'analyse vise à rassembler en un ou plusieurs graphes la plus grande partie possible de l'information contenu dans le tableau du type individus (observations) x variables quantitatives, en s'attachant aux corrélations entre les variables. Les variables physico-chimiques sont replacées à l'intérieur d'un cercle de rayon unité.

RÉSULTATS

Les grandeurs physico-chimiques de l'eau de la Garonne et leurs variations annuelles sont présentées dans les *figures 2, 3 et 4*. les différences physico-chimiques de l'eau de six stations des bras morts par rapport à la station de référence de la Garonne sont illustrées sous la forme de graphiques dans les *figures 5, 6 et 7*. Les valeurs moyennes et les écart-types des variables mesurées dans chaque station sont indiquées dans le *tableau 3*. Les coefficients de corrélation calculés entre 14 variables sont donnés dans le *tableau 4*.

Tableau 3 Valeurs moyennes et écart-types des variables physico-chimiques mesurées dans chaque station en 1988-1990.

Table 3 *Mean values with standard deviation for different physical and chemical parameters analysed in each sampling station during 1988-1990*

	RB amont	RB aval	PV amont	PV aval	GF amont	GF aval	Garonne
Température	11,2 ± 5,8	11,4 ± 5,6	12,9 ± 5,8	11,9 ± 5,7	12,8 ± 6,6	11,8 ± 6,3	10,3 ± 4,8
pH	7,7 ± 0,3	7,5 ± 0,1	7,8 ± 0,3	7,7 ± 0,3	7,7 ± 0,3	7,7 ± 0,2	7,6 ± 0,1
Conductivité	274 ± 26	274 ± 22	275 ± 23	262 ± 28	269 ± 23	261 ± 20	260 ± 22
O ₂	86,8 ± 11,8	81,1 ± 13,7	83,8 ± 15,9	88,5 ± 12,9	84,2 ± 13,3	91,1 ± 9,2	89,8 ± 11,7
Oxydabilité	1,7 ± 0,6	2,0 ± 0,8	3,7 ± 1,7	2,9 ± 1,3	3,4 ± 1,3	2,5 ± 0,9	1,6 ± 0,5
T.A.C.	94 ± 8	96 ± 14	93 ± 19	91 ± 12	94 ± 16	91 ± 16	84 ± 10
N - NH ₄ ⁺	0,49 ± 0,21	0,51 ± 0,27	0,24 ± 0,12	0,39 ± 0,25	0,26 ± 0,14	0,35 ± 0,27	0,68 ± 0,29
N - NO ₃ ⁻	6,4 ± 2,4	6,5 ± 2,4	3,1 ± 1,4	4,5 ± 1,4	3,6 ± 2,2	6,0 ± 2,2	8,3 ± 2,0
P - PO ₄ ⁻⁻⁻	0,57 ± 0,21	0,48 ± 0,21	0,21 ± 0,14	0,41 ± 0,16	0,29 ± 0,17	0,49 ± 0,17	0,56 ± 0,27
SO ₄ ⁻⁻	20,7 ± 3,6	21,9 ± 3,6	25,5 ± 4,7	24,2 ± 4,0	21,9 ± 3,7	22,7 ± 3,4	25,3 ± 4,1
Cl ⁻	15,5 ± 4,2	15,9 ± 4,1	14,4 ± 4,0	14,6 ± 4,9	13,8 ± 3,6	15,9 ± 5,3	16,1 ± 4,6
Ca ⁺⁺	41,4 ± 3,9	43,0 ± 5,3	40,7 ± 5,0	42,7 ± 4,9	42,2 ± 4,3	42,3 ± 4,3	41,5 ± 4,2
Mg ⁺⁺	3,0 ± 1,5	3,0 ± 1,4	3,0 ± 0,9	2,3 ± 0,9	32,0 ± 1,0	3,1 ± 1,0	2,7 ± 0,9
Chlorophylle a	49,2 ± 22,6	64,6 ± 29,6	81,9 ± 33,2	50,8 ± 22,5	61,3 ± 20,6	45,2 ± 5,9	21,9 ± 11,4

Tableau 4 Corrélations entre les variables physico-chimiques mesurées dans toutes les stations de mai 1988 à avril 1990.

Table 4 Coefficients of correlation between different physical and chemical measured at every sampling station for May 1988 to April 1990.

	Temp.	pH	Cond.	O ₂	Oxydab.	T.A.C.	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	PO ₄ ⁻⁻⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl ⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Chl. a
Moyenne	12,6	7,6	275,3	89,5	2,23	93	0,39	5,4	0,47	22,1	16,35	41,78	3,03	57,29
Ecart-Type	6,27	0,18	22,75	11,29	1,19	14	0,17	2,15	0,17	2,24	4,25	4,39	0,92	37,89
Temp.	1													
pH	-0,489**	1												
Cond.	0,305	-0,336	1											
O ₂	-0,435*	0,359	-0,528**	1										
Oxydab.	0,514**	0,026	0,461*	-0,302	1									
T.A.C.	-0,255	0,089	0,561**	-0,384*	0,129	1								
N-NH ₄ ⁺	0,012	-0,466*	-0,209	-0,030	-0,531**	-0,290	1							
N-NO ₃ ⁻	0,297	-0,561**	0,280	-0,219	-0,233	-0,056	0,474*	1						
PO ₄ ⁻⁻⁻	0,182	-0,463*	0,272	-0,092	-0,209	-0,044	0,429*	0,823**	1					
SO ₄ ⁻⁻	-0,251	-0,025	0,053**	-0,166	0,139	0,335	-0,292	0,252	0,227	1				
Cl ⁻	0,318	-0,281	0,630**	-0,595**	0,321	0,445*	-0,113	0,503**	0,398*	0,566**	1			
Ca ⁺⁺	-0,081	0,102	0,686**	-0,456*	0,472*	0,706**	-0,476*	0,045	0,074	0,698**	0,622**	1		
Mg ⁺⁺	0,279	-0,317	0,395*	-0,303	-0,176	0,119	0,031	0,485**	0,241	0,261	0,391*	0,065	1	
Chl. a	0,648**	-0,143	0,400*	-0,503**	0,530**	0,019	-0,207	-0,074	-0,105	-0,145	0,253	0,065	0,277	1

* corrélation significative au seuil de 5 % ;

** corrélation hautement significative au seuil de 1 %

* correlation significant ($\alpha = 0.05$)** correlation highly significant ($\alpha = 0.01$)

En vue de l'analyse statistique, un tableau de données comprenant 28 unités statistiques (7 stations de prélèvements portant chacune sur 4 saisons) et 14 variables physico-chimiques, a été établi (tableau 5).

Tableau 5 Résultat des relevés physico-chimiques réalisés sur sept stations de mai 1988 à avril 1990 (28 prélèvements x 14 variables).

Table 5 Result of physical and chemical water variables measured at every sampling station between May 1988 and April 1990 (28 samples x 14 variables).

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	D	St
5,3	7,7	297	101,8	1,07	112	0,43	7,67	0,77	23,3	16,3	42,0	2,9	38,4	1	St1
5,6	7,6	277	87,6	1,60	89	0,37	4,00	0,37	24,0	16,7	41,3	2,0	36,2	1	St2
7,5	7,6	274	104,0	1,43	86	0,33	3,67	0,31	24,3	13,3	41,0	4,1	53,8	1	St3
6,0	7,7	259	106,2	2,23	83	0,37	4,33	0,53	22,3	14,7	39,0	2,0	18,2	1	St4
6,2	8,2	258	96,3	2,27	89	0,18	1,97	0,25	21,7	14,3	42,0	2,4	33,1	1	St5
5,7	7,8	261	100,4	1,80	85	0,38	4,33	0,52	23,0	13,3	42,7	2,7	20,3	1	St6
5,3	7,6	270	104,7	1,20	85	0,53	5,23	0,57	24,7	13,3	41,3	2,7	5,8	1	St7
15,5	7,5	267	86,0	1,27	109	0,67	4,00	0,50	15,7	12,7	35,7	2,5	62,1	2	St1
16,0	7,6	253	84,8	1,40	77	0,63	5,00	0,44	18,3	11,7	35,7	2,7	72,3	2	St2
16,6	7,7	253	95,8	2,50	73	0,30	2,33	0,25	19,7	11,0	34,0	2,8	141,2	2	St3
16,6	7,7	245	98,6	2,17	74	0,37	4,33	0,33	20,0	9,3	37,0	1,9	35,2	2	St4
16,9	7,5	248	97,5	2,80	79	0,37	3,67	0,33	17,0	11,7	36,7	2,1	58,1	2	St5
17,7	7,7	247	95,5	2,20	77	0,17	5,33	0,47	20,0	12,7	37,7	3,0	35,4	2	St6
11,6	7,6	235	99,2	1,00	72	0,83	8,00	0,43	19,0	13,0	33,7	3,2	26,4	2	St7
21,4	7,4	315	67,7	1,63	89	0,60	8,67	0,67	22,3	20,7	41,0	4,9	129,7	3	St1
20,1	7,4	297	68,0	1,53	95	0,47	7,67	0,55	23,3	21,3	41,3	5,2	89,2	3	St2
21,8	7,8	309	73,7	6,47	98	0,17	3,33	0,39	22,0	20,0	49,0	2,0	174,4	3	St3
21,0	7,4	310	80,9	4,37	104	0,40	5,33	0,52	24,3	23,7	48,7	1,6	54,6	3	St4
22,7	7,4	307	81,5	4,43	92	0,23	7,67	0,60	24,3	18,0	45,3	4,1	84,0	3	St5
22,1	7,7	297	102,6	2,83	95	0,23	8,33	0,52	22,7	23,3	42,3	4,5	76,0	3	St6
18,2	7,4	281	75,9	2,07	83	0,57	10,00	0,87	23,7	25,0	44,0	3,9	43,0	3	St7
7,0	7,7	279	101,8	1,23	98	0,43	6,67	0,67	21,7	13,0	42,7	3,3	45,6	4	St1
7,3	7,5	296	79,1	1,77	116	0,30	7,00	0,50	23,7	18,3	48,7	3,0	34,5	4	St2
7,7	7,7	304	84,5	3,67	119	0,23	2,33	0,11	23,7	17,3	45,3	3,8	50,6	4	St3
8,1	7,9	275	83,0	2,33	106	0,40	5,00	0,45	23,3	16,7	48,3	2,5	27,0	4	St4
7,9	7,8	283	79,4	1,87	116	0,20	2,67	0,18	22,0	15,0	47,7	3,3	62,9	4	St5
7,7	7,8	249	81,8	1,70	114	0,23	5,00	0,43	23,3	23,7	44,7	3,4	70,2	4	St6
7,5	7,6	263	86,7	1,53	92	0,57	8,00	0,50	23,3	17,7	41,0	2,2	26,0	4	St7

Code des variables

1. Température de l'eau (°C)
2. pH
3. Conductivité (µS/cm)
4. Oxygène (% saturation)
5. Oxydabilité (mg/l d'oxygène)
6. Alcalinité totale (TAC) (mg/l de HCO₃⁻)
7. Ammoniaque (mg/l de NH₄⁺)
8. Nitrates (mg/l de NO₃⁻)
9. Orthophosphates (mg/l de PO₄⁻⁻⁻)
10. Sulfates (mg/l de SO₄⁻⁻⁻)
11. Chlorures (mg/l de Cl⁻)
12. Calcium (mg/l de Ca⁺⁺)
13. Magnésium (mg/l de Mg⁺⁺)
14. Chlorophylle a (µg/l)

Code des dates (D)

1. Hiver
2. Printemps
3. Été
4. Automne

Code des stations (S)

- St1. Ramier de Bigorre amont
- St2. Ramier de Bigorre aval
- St3. Port-Vieux amont
- St4. Port-Vieux aval
- St5. Grenade-Fontaine amont
- St6. Grenade-Fontaine aval
- St7. Garonne

L'analyse de variance réalisée entre les saisons présente des différences significatives pour toutes les variables physico-chimiques, sauf pour l'ammoniaque (7), les phosphates (9) et le magnésium (13) (*tableau 6*). Seuls l'oxydabilité (5), l'ammoniaque (7), les nitrates (8) et les phosphates (9) diffèrent significativement entre les stations de mesures (*tableau 6*).

Tableau 6 Analyse de variance des variables physico-chimiques mesurées entre saisons (D) et entre stations (S). Le degré de signification est indiqué par le nombre d'astérisques.

Table 6 Analysis of variance for the physical and chemical water variables measured between seasons (D) and between stations (S). The significance level is shown by the number of asterisks.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
D	****	*	****	****	*	****		*		****	****	****		***
S					*		***	*	***					

* = 0,05

** = 0,01

*** = 0,005

**** = 0,001

Ces résultats ont mis globalement en évidence des variations fortement saisonnières des variables physico-chimiques, et seuls les éléments nutritifs subissent des variations stationnelles. L'évolution du magnésium est, quant à elle, beaucoup plus aléatoire.

Devant l'absence d'importantes variations spatiales, les observations indépendantes faites en des points et à des dates différentes ont permis une analyse en composantes principales normées.

La *figure 8* présente les principaux résultats de l'ACP normées. Le graphe des valeurs propres (*figure 8A*) montre que les corrélations inter-variables liées aux structures spatio-temporelles sont essentiellement décomposées suivant les trois premiers facteurs.

Le premier axe factoriel (32,8 % d'inertie) prend en compte de l'opposition des variables saturation en oxygène (4) et conductivité (3), chlorures (11) et calcium (12). Il indique un gradient de minéralisation croissante de l'hiver au printemps, maximal en été, au sein des trois bras morts.

Le niveau global de la fertilité – ammoniaque (7), nitrates (8) et phosphates (9) – représenté par le second axe factoriel (22,5 % d'inertie) montre un gradient amont-aval avec un rythme saisonnier (à l'exception du bras mort RB communicant en amont avec le fleuve), dont le maximum est atteint en été dans toutes les stations.

Le troisième type de phénomènes est celui du réchauffement de l'eau, notamment dans les bras morts qui ne communiquent pas avec le fleuve dans leur extrémité amont (PV et GF). Il s'accompagne d'un accroissement de la concentration en chlorophylle a (14) vers l'amont, correspondant aussi à

l'augmentation de l'oxydabilité (5), avec une exception pour le bras mort RB et la Garonne en été (axe 3, 16,6 % d'inertie). Conformément à l'interprétation de ce troisième axe, cette concentration est en effet maximale dans le bras mort PV en amont (station 3) en été.

DISCUSSION ET CONCLUSION

1. Caractéristiques de l'eau de la Garonne

1.1. Débit

Les conditions climatiques au cours des deux années d'étude ont donné des débits globalement inférieurs aux moyennes établies sur plusieurs décennies (AGENCE DE L'EAU ADOUR-GARONNE, 1989 ; LAMBERT *et al.*, 1990). Les débits instantanés minima enregistrés en aval de Toulouse, ont atteint 24,5 m³/s le 15 septembre 1988, 11,4 m³/s le 27 juillet 1989 et 9 m³/s le 28 janvier 1990 (données du Service Hydrologique de Toulouse). La *figure 2*, qui donne les valeurs quotidiennes de débit, indique aussi en pointillé les moyennes mensuelles établies de 1980 à 1990 en aval de Toulouse. Les écarts traduisent, sur la base des critères établis par PROBST (1983), que 1988 est une année « moyennement » sèche et que 1989 est une année « exceptionnellement » sèche. Les crues de printemps ont été moyennes ou faibles (moins de 1 300 m³/s) et peu durables, séparant de longues périodes de basses eaux (*figures 2, 3 et 4*). Les bras morts n'ont pas connu d'assec ; ils n'ont été recouverts par le fleuve qu'en périodes de fortes eaux printanières (débit supérieur à environ 400 m³/s). Les phénomènes observés ont évolué chaque année de manière continue après la période de fortes eaux. Aucune pollution accidentelle n'a été observée. Les conditions de la recherche des mécanismes d'évolution de la qualité des eaux dans les bras morts ont donc été favorables pendant cette séquence de deux années.

1.2. Température

La température de l'eau de la Garonne suit un cycle annuel entre les extrêmes de 1,7° C et 18,7° C. L'année 1989 est caractérisée par des températures plus élevées qu'en 1988. Les évolutions thermiques annuelles sont en gros sinusoïdales avec des irrégularités (tendance au refroidissement de l'eau) en périodes de montées des eaux (printemps 1988 et 1989) (*fig. 2*).

La température de l'eau observée un jour donné entre 8 h et 9 h GMT est en relation linéaire ($r = 0,92$; $N = 24$) avec la température moyenne de l'air relevée le jour précédent (*fig. 2*). La corrélation est moins nette si on relie les températures de l'air et de l'eau du même jour ($r = 0,87$). De même, un décalage de 2 jours donne une moindre corrélation ($r = 0,78$).

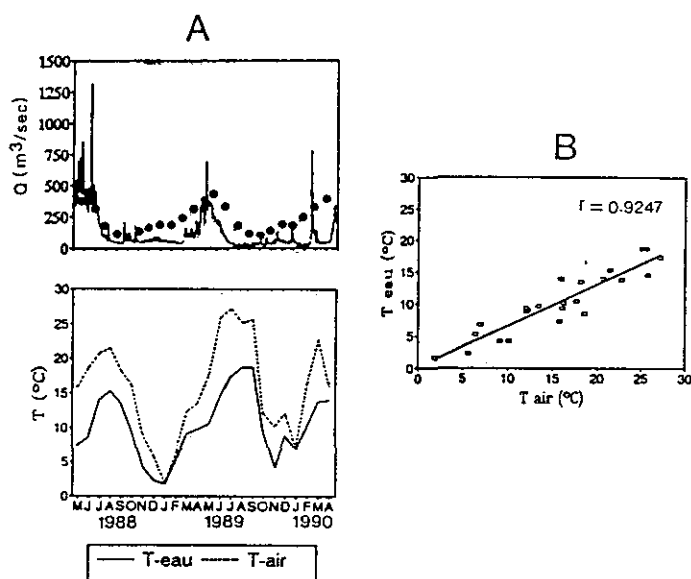


Figure 2 Variations de la température de l'eau de la Garonne et de la température de l'air en fonction du débit de la Garonne (A). Relation entre la température de l'eau et de l'air (B).

Variations of water temperature of the river Garonne and air temperature as a function of water discharge. Relationship between water temperature and air temperature.

1.3. Les éléments dissous

Les taux d'éléments dissous de l'eau suivent en Garonne des variations au premier abord complexes (fig. 3 et 4). La conductivité, le calcium et l'oxydabilité diminuent en phases de fortes eaux (fig. 3). Les deux périodes printanières de fortes eaux s'accompagnent aussi d'une dilution des chlorures et de sulfates (fig. 3). Ces derniers éléments sont habituellement considérés comme des traceurs insensibles à l'activité biologique et donc représentatifs de la minéralisation de l'eau dans le bassin versant. Ces taux sont significativement corrélés à la valeur de conductivité (tableau 4), à laquelle ils semblent ainsi contribuer de manière déterminante.

En combinant les mesures de débit et les résultats des analyses, on constate que le flux de Cl^- ou de SO_4^{--} transitant par la Garonne est constant à environ 1 kg/s de Cl^- et à environ 2 kg/s de SO_4^{--} en période de basses eaux. En phases de hautes eaux printanières, les flux de Cl^- et SO_4^{--} sont accrus d'un facteur 15 et 12,5 respectivement. L'accroissement des flux, plus élevé au printemps 1988 par rapport au printemps 1989, semble proportionnel aux débits maxima atteints. La mobilisation de SO_4^{--} et Cl^- en phases de hautes eaux traduit l'intensité du drainage du bassin versant.

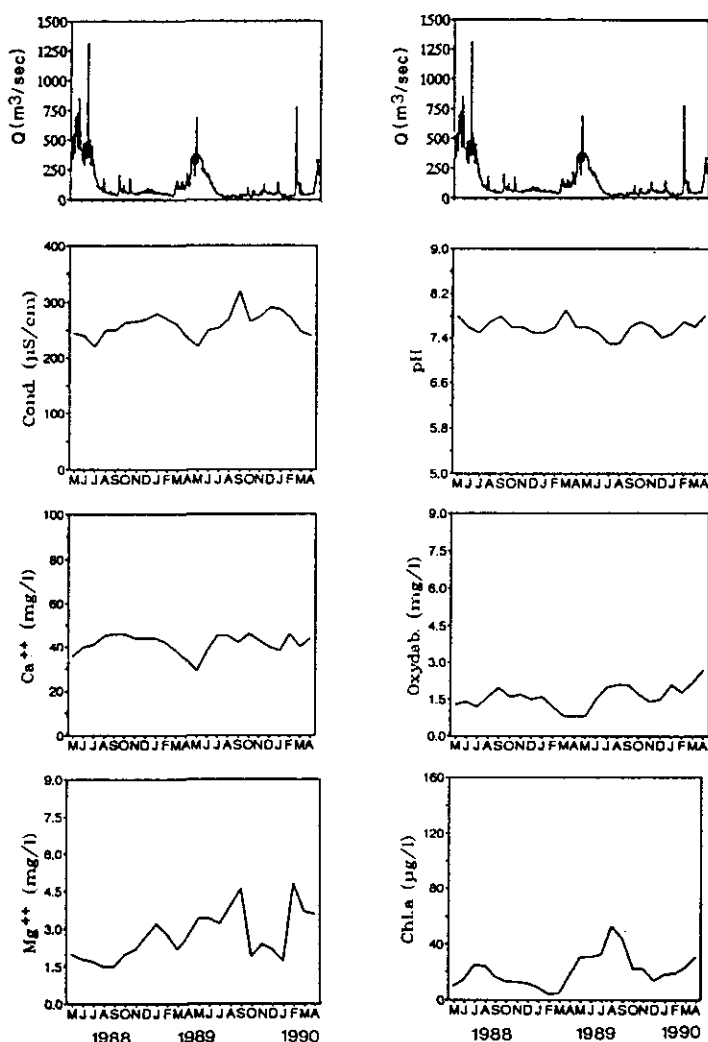


Figure 3 Variations de la conductivité, du calcium, du magnésium, du pH, de l'oxydabilité et de la chlorophylle a mesurés sur la Garonne en fonction du débit.

Variations of electrical conductivity, calcium, magnesium, pH, oxydability and chlorophyll a measured in the river Garonne as a function of water discharge.

Les flux de nitrates transitant dans le fleuve présentent aussi des pics aux mois d'avril-mai. Le rapport entre ce flux maximal (en kg/s) et le flux minimum observé à l'étiage, est de 30 alors qu'il n'était que de 12,5 pour SO_4^{--} et 15 pour Cl^- . Ce fort accroissement peut être expliqué par le drainage des apports saisonniers liés aux activités agricoles (épandage sur les cultures de blé en mars).

Les taux d'ammoniaque sont essentiellement déterminés par les rejets industriels et domestiques de l'agglomération toulousaine, grossièrement évalués à 7,26 tonnes/jour (AGENCE DE L'EAU ADOUR-GARONNE, 1989). Pour un débit d'étiage de 50 m³/s, cet apport se traduit à Toulouse par une élévation moyenne des taux d'ammoniaque de l'ordre de 1,7 mg/l. Les résultats observés 10 km en aval indiquent une auto-épuration plus ou moins complète selon les dates. Les taux d'ammoniaque constituent la principale pollution des eaux de ce segment de Garonne (AGENCE DE L'EAU ADOUR-GARONNE, 1989).

Les phosphates observés dans les échantillons d'eau résultent de l'érosion du bassin versant, des apports humains et de l'activité hydrobiologique. Les taux de phosphates sont élevés (0,1 à 1 mg/l). La charge transportée par la Garonne s'élève avec les fortes eaux, mais il existe aussi des fluctuations saisonnières indépendantes des variations de débit. Ces fluctuations pourraient traduire un cycle annuel de minéralisation-déminéralisation des matières organiques dont l'abondance est traduite par les valeurs de l'oxydabilité (*fig. 3*).

Les matières organiques subissent une évolution qui est corrélée aux taux de chlorophylle a. Elles proviendraient donc essentiellement des corps cellulaires planctoniques et de leurs métabolites. Les rejets de l'agglomération toulousaine doivent aussi contribuer à maintenir le taux de matières organiques.

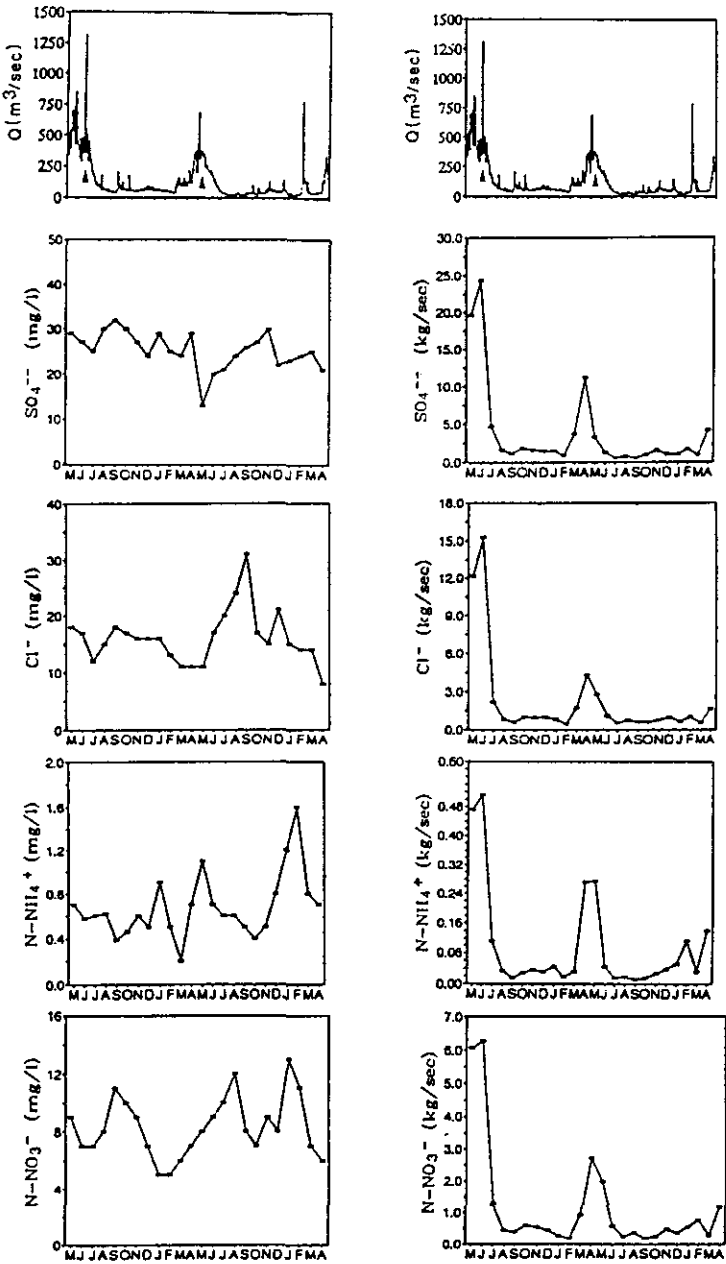
1.4. Equilibre acido-basique de l'eau

Les valeurs de pH sont homogènes dans le temps autour d'une valeur moyenne de 7,6 (*tableau 3*). Ces valeurs sont en soi propices à une bonne productivité biologique (NTAC, 1964) et correspondent aux gammes généralement observées pour les eaux naturelles (NISBET et VERNEAUX, 1970 ; AGENCE DE L'EAU ADOUR-GARONNE, 1989). Sachant qu'à ces valeurs de pH et pour une eau peu polluée, c'est le système CO₂-bicarbonates qui détermine essentiellement l'équilibre acide-base, on devrait obtenir, pour des eaux équilibrées avec le CO₂ atmosphérique, des valeurs d'alcalinité carbonatée de l'ordre de 17 mg/l. Or les valeurs moyennes de TAC se situent à 93 mg/l (*tableau 3*), ce qui traduirait un état chronique d'hypercapnie des eaux de la Garonne, tout au long de l'année et avec des maximas en automne et des minimas au moment des fortes eaux printanières (*fig. 3*). Ce gaz carbonique dissous en excès résulterait de la respiration de l'ensemble flore-faune aquatique et de l'épuration aérobie des rejets urbains de l'agglomération toulousaine. Ces valeurs élevées d'alcalinité carbonatée et de CO₂ dissous doivent faciliter le développement algal.

2. Variabilité entre les bras morts et la Garonne

2.1. Température, conductivité et pH

A chaque campagne, la température, la conductivité et le pH varient peu d'un bras mort à l'autre. Cette homogénéité spatiale se double d'une homogénéité temporelle pour le pH (valeur stable autour d'une moyenne de 7,6). La température et la conductivité suivent des cycles saisonniers différents.



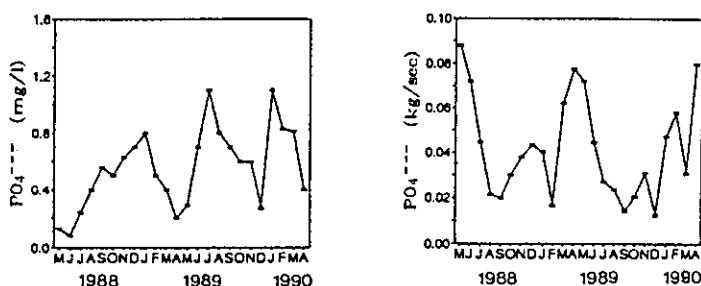


Figure 4 Variations des concentrations et des charges en sulfates, chlorures, ammoniacque, nitrates et phosphates de la Garonne en fonction du débit.

Concentration and load variations of sulphates, chlorides, ammonia, nitrates and orthophosphates of the river Garonne as a function of water discharge.

La température évolue parallèlement dans les sept stations, mais l'amplitude du cycle été-hiver est plus grande dans les trois bras morts. Au sein des bras morts, les profils longitudinaux de température sont très semblables en été, caractérisés par un léger réchauffement selon un gradient aval-amont mis en évidence dans l'ACP (fig. 8). Ce gradient est plus marqué à PV et GF qu'au RB où subsiste en été une faible circulation d'eau du fleuve. La profondeur est insuffisante pour donner lieu à une stratification thermique notable. Il apparaît que la température des bras morts, en dehors des périodes de crue qui alignent les valeurs sur celles du fleuve, est corrélée positivement à la température moyenne de l'air.

La température semble jouer un rôle déterminant dans la productivité des bras morts, car les coefficients de corrélation entre la température, d'une part et, les taux de matières organiques, de chlorophylle a et la valeur de pH d'autre part, sont élevés (tableau 4). La hausse de la température en été s'accompagne d'une production de matière organique, plus particulièrement dans la partie amont des bras morts PV et GF (de 4,4 à 6,5 mg/l en moyenne) (tableau 3). Ce phénomène est interprété comme résultant d'un accroissement de l'activité biologique essentiellement phytoplanctonique car il est couplé à une hausse de la concentration de chlorophylle a (fig. 6). La stimulation de l'activité biologique par l'augmentation de température contribue également à abaisser la valeur de pH relevée le matin à l'amont des bras morts. La persistance d'un faible renouvellement d'eau par l'amont à RB, limite quelque peu le réchauffement estival par rapport à PV et GF. La productivité associée, évaluée par les taux de chlorophylle a, de matières organiques et les variations de pH et d'oxygène sont aussi inférieures, relativement aux autres bras morts qui n'ont pas d'apport par l'amont.

La conductivité dans les bras morts est très voisine de celle observée dans la Garonne. Ceci constitue un premier indice selon lequel la qualité de l'eau des bras morts est imposée par celle du fleuve. Au printemps, le recouvrement régulier des bras morts par des eaux généralement diluées en condition de crue, induisent un abaissement annuel de la conductivité des eaux des bras morts, au niveau de celle du fleuve.

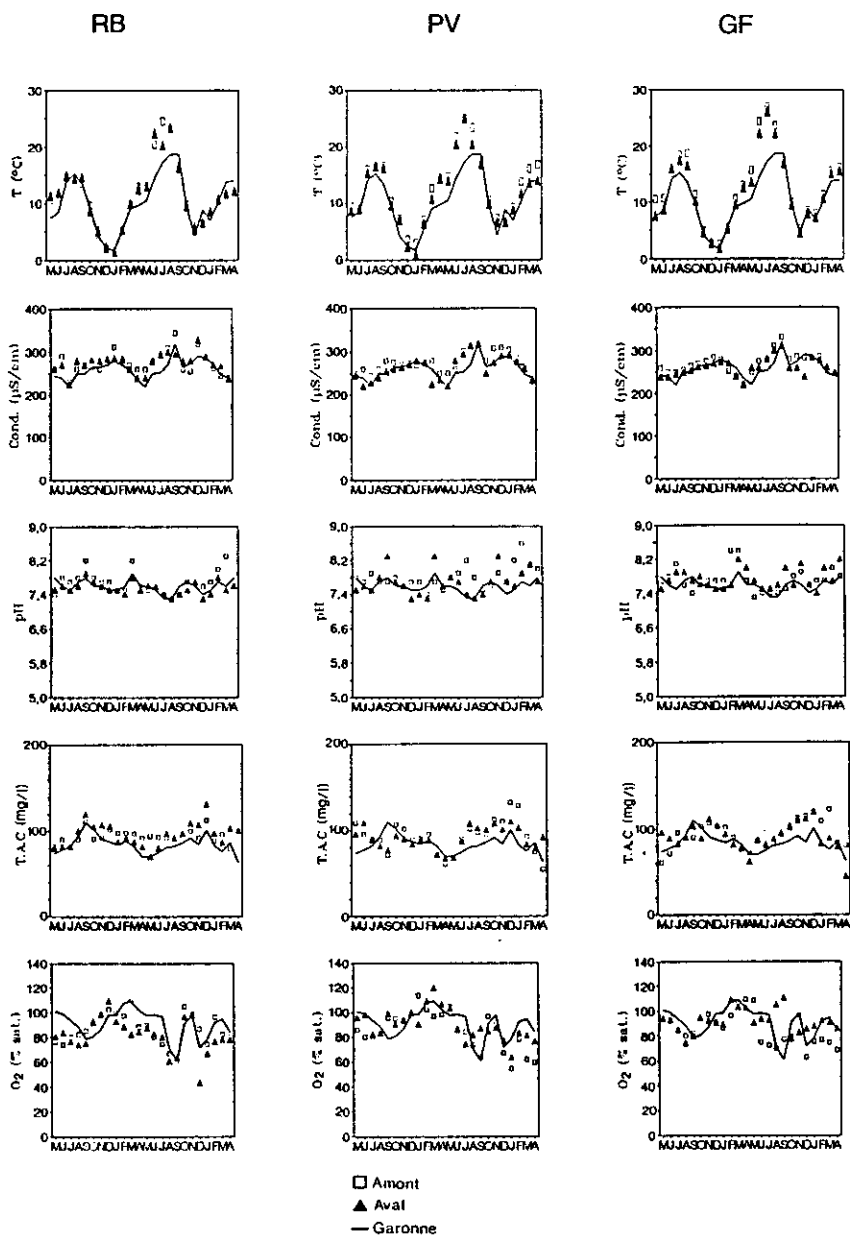


Figure 5 Evolution comparée des valeurs en température de l'eau, conductivité, pH, alcalinité total (TAC) et oxygène dissous de trois bras morts en fonction des valeurs de la Garonne.

Compared evolution of water temperature, electrical conductivity, pH, total alkalinity and dissolved oxygen of three ancient arms with concentrations of the river Garonne.

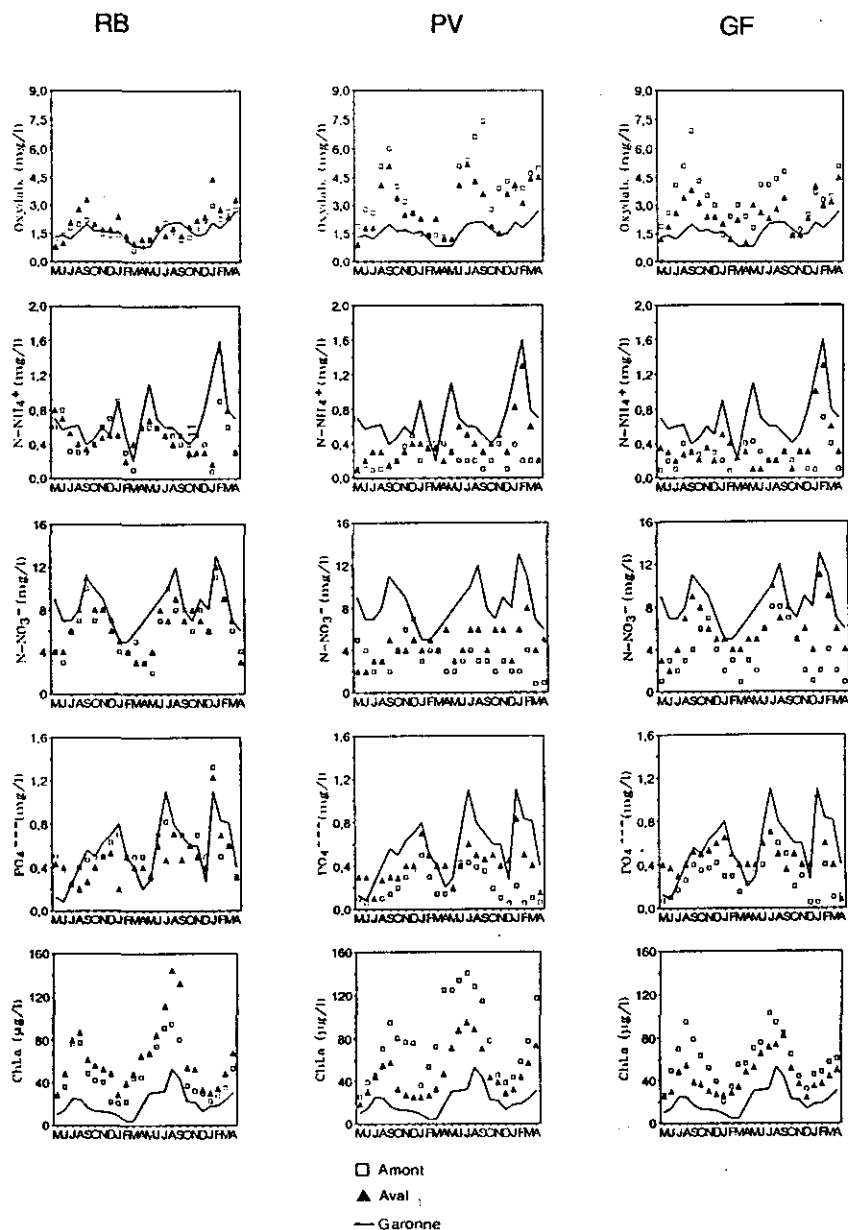


Figure 6 Evolution comparée des valeurs en oxydabilité, ammoniacque, nitrates, phosphates et chlorophylle a de trois bras morts en fonction des valeurs de la Garonne.

Compared evolution of oxydability, ammonia, nitrates, orthophosphates and chlorophyll a of three ancient arms with concentrations of the river Garonne.

Ce fonctionnement est différent de ce qui a été décrit pour la zone humide de la Morte du Sauget du Rhône (CARREL et JUGET, 1987) où la conductivité reste la plupart du temps supérieure à celle du fleuve. On peut interpréter ceci d'une part en considérant que le Rhône ne recouvre qu'exceptionnellement cette zone en cas de forte crue et, d'autre part, que les eaux du Rhône de référence sont peu minéralisées en raison des abondantes fontes de neiges (CARREL, 1986).

La composition des eaux de nappe phréatique dans un ancien bras mort endigué situé dans la zone d'étude, a été donnée par FUSTEC *et al.*, 1990. Par rapport aux eaux de Garonne, la conductivité, le calcium et le magnésium sont environ 3 fois plus élevés dans la nappe. Si cette nappe s'écoulait dans les bras morts, elle tendrait à augmenter la minéralisation par rapport à la Garonne et ceci surtout aux stations amont des bras morts PV et GF, qui ne reçoivent pas en été d'apport direct. Or c'est l'inverse qui est observé et donc l'hypothèse d'un faible apport des eaux de nappe dans les bras morts peut être retenue. Les profils longitudinaux indiquent, en été, une minéralisation croissante de l'amont vers l'aval (*fig. 8*), qui peut être interprétée par les effets d'évaporation d'une part et par les apports d'eau plus concentrée du fleuve par la communication aval, d'autre part. Si on réfère au modèle de PENMAN (1956), l'évaporation peut atteindre 108 mm les mois les plus chauds, soit environ 10 % de la masse d'eau. Ceci crée un appel d'eau de la Garonne (où les concentrations s'élèvent en été) vers le bras mort (initialement rempli au printemps d'eau peu minéralisée et où certains éléments sont consommés par l'activité biologique).

2.2. Oxygène dissous et alcalinité

Le pourcentage matinal de saturation en oxygène est modifié essentiellement par l'activité biologique. Il est stable et élevé au cours de la période printanière correspondant à la remontée du niveau d'eau de la Garonne. En dehors de cette période où le fleuve impose des taux d'oxygène proches de la saturation à l'air, un gradient amont-aval se produit en périodes des basses eaux hivernale et estivale. Ceci est particulièrement marqué dans les bras morts isolés à leur extrémité amont (PV et GF). Dans ces milieux stagnants et peu profonds, il semble que les taux d'oxygène dépendent de l'activité métabolique de la flore et de la faune, puisqu'il existe une corrélation hautement significative entre les teneurs en chlorophylle *a* et les taux d'oxygène mesurés le matin (*tableau 4*).

L'alcalinité carbonatée, évaluée par le TAC, représente à la fois un pouvoir tampon de l'eau face aux éventuelles agressions acido-basiques et une réserve potentielle de CO₂ pour la photosynthèse. Elle a tendance à s'élever, par rapport à la Garonne, dans les bras morts et en condition d'été et d'automne, notamment en 1989 dans les bras morts PV et GF. La respiration nocturne des végétaux et animaux aquatiques, accentue l'excédent chronique de CO₂. Comme le pH est bien tamponné par la composition minérale de l'eau, les taux des bicarbonates s'élèvent en même temps que la production de CO₂. A l'appui de cette interprétation, il a été vérifié qu'en condition de photosynthèse active de l'après-midi, en été, la valeur de pH augmente seulement de 0,2 unités par rapport au matin.

2.3. Les ions minéraux

Les principaux ions minéraux suivis dans toutes les stations présentent un cycle saisonnier moins accentué pour les sulfates, les chlorures et le calcium que pour le magnésium. Les trois premiers ions sont fortement corrélés (tableau 4), ils évoluent selon le débit du fleuve. La hausse du niveau d'eau de la Garonne (en printemps) se traduit par une baisse de teneurs en sulfates, chlorures et calcium dans les bras morts. Les taux retournent à leurs valeurs de base après le retrait des eaux fluviales mais de manière plus ou moins rapide selon l'importance des apports de la Garonne. Ce résultat est différent des observations faites dans un bras mort du Rhône (la lône de Pêcheurs) (JUGET *et al.*, 1979 ; JUGET et ROUX, 1982) également en communication avec le fleuve dans son partie aval. Les apports minéraux venant des nappes phréatiques, mis en évidence dans les bras morts du Rhône, n'apparaissent pas dans le cas des bras morts de la Garonne. Dans le cas contraire, on assisterait en été à une augmentation plus rapide et en tout point de la conductivité et des teneurs en calcium et magnésium (FUSTEC *et al.*, 1990).

Le magnésium, ion peu impliqué dans les processus biologiques, constitue un bon traceur pour analyser l'impact hydrologique relatif des nappes et de la Garonne sur la qualité des eaux des bras morts. On remarquera que l'enrichissement en Mg^{++} se produit lorsque le débit baisse fortement dans le fleuve au cours de l'été et que toute augmentation du débit au printemps entraîne une forte diminution de teneurs dans les bras morts. Cette relation opposée entre le débit et les taux de magnésium indique un renouvellement rapide des eaux des bras morts communiquant largement avec le fleuve (RB et GF), plus lent dans le bras mort PV.

2.4. Les éléments nutritifs

Les principaux éléments nutritifs (nitrates et phosphates) sont présents dans les bras morts à des taux généralement inférieurs à ceux de la Garonne. Cet écart pourrait résulter *a priori* soit d'un effet de dilution de l'eau des bras morts par des apports de nappe (dénitrification sous la forêt alluviale) (DECAMPS et NAIMAN, 1989), soit d'un effet d'utilisation biologique au sein de l'eau. Comme la première hypothèse a été exclue sur la base des données portant sur la conductivité et la teneur en ions Ca^{++} et Mg^{++} , on privilégiera la seconde. Les évolutions au cours de l'année permettent de mieux approcher les mécanismes qui déterminent les taux de fertilisants de l'eau dans les bras morts.

Les taux de nitrates et de phosphates observés dans le bras mort RB suivent de très près les variations observées dans la Garonne, tant en amont qu'en aval du bras mort (fig. 6). Il s'agit ici d'une influence prépondérante et immédiate des apports quotidiens du fleuve par la communication amont.

La même tendance a été observée au bras mort GF pour la station aval, en large communication avec le fleuve. Par contre, la station amont présente des taux de nitrates moins élevés mais dont l'évolution reste parallèle à celle du fleuve. Il s'agirait donc d'une consommation par les phénomènes biologiques non compensée instantanément (en dehors des crues) par les apports du fleuve.

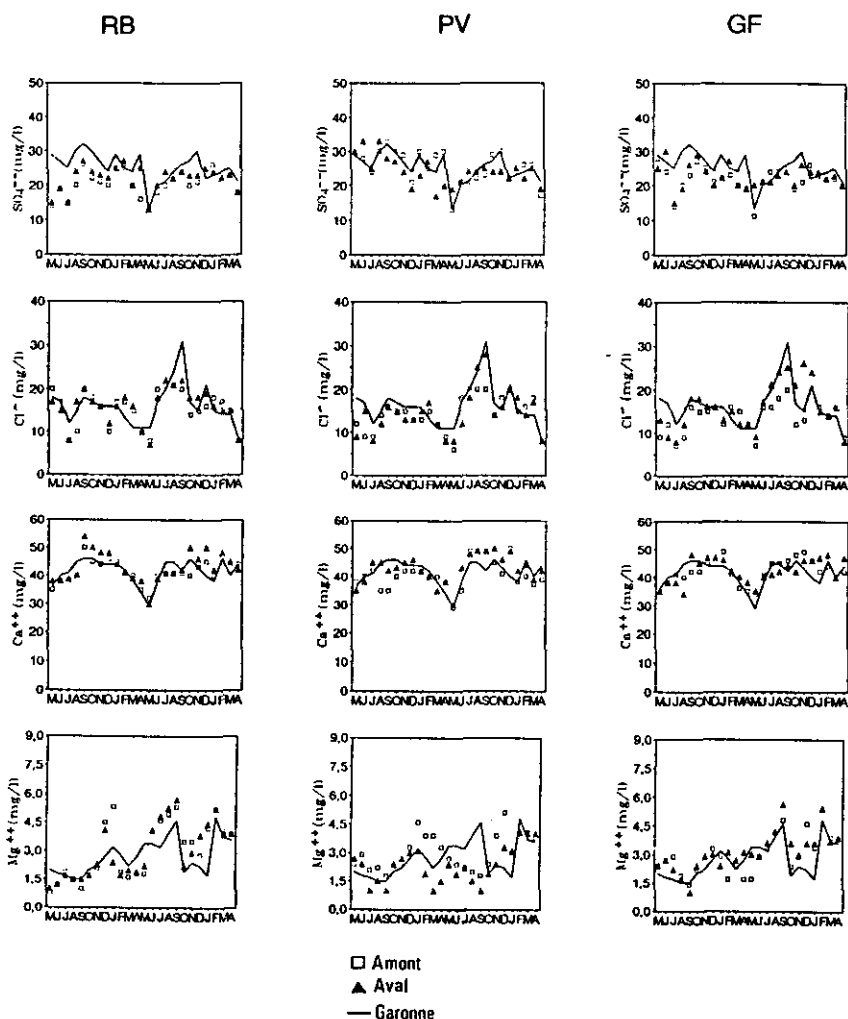


Figure 7 Evolution comparée des valeurs en sulfates, chlorures, calcium et magnésium de trois bras morts en fonction des valeurs de la Garonne.

Compared evolution of sulphates, chlorides, calcium and magnesium of three ancient arms with concentrations of the river Garonne.

Au bras mort PV on observe des écarts entre les taux de nitrates et de phosphates aussi bien à la station amont qu'à la station aval. Ce bras mort a donc une qualité d'eau qui n'est pas instantanément calquée sur celle de la Garonne. On observe en effet un décalage de plusieurs mois entre la remontée des taux de nitrates après les fortes eaux de printemps entre la Garonne d'une part et le bras mort d'autre part.

La communication du bras mort et du fleuve joue un rôle capital dans l'alimentation des bras morts en éléments nutritifs : action directe et immédiate en

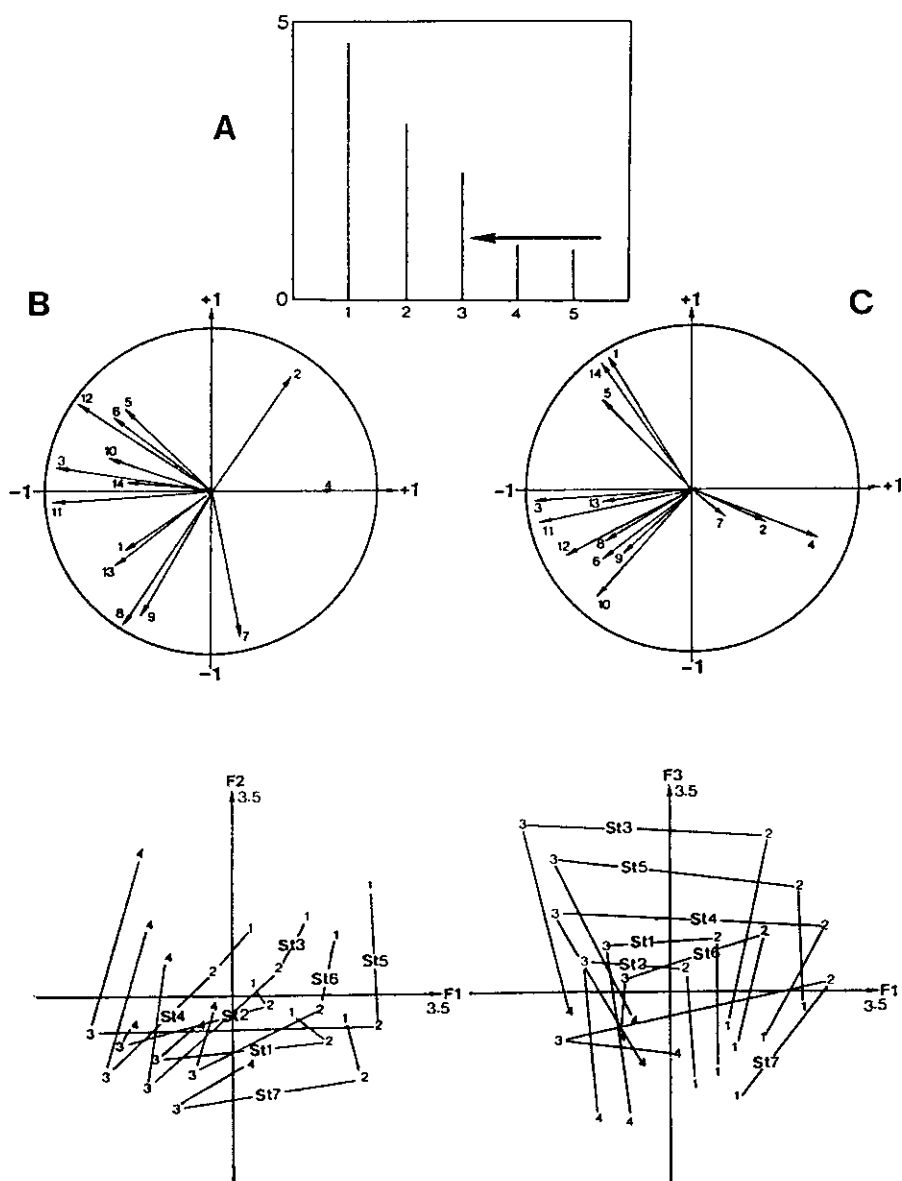


Figure 8 Analyse en composantes principales (ACP) normées du tableau des relevés physico-chimiques.

A. Répartition de l'inertie entre les axes (graphes des valeurs propres). B. Cercle de corrélation des variables ($F1 \times F2$) et carte factorielle des individus ($F1 \times F2$). C. Cercle de corrélation des variables ($F1 \times F3$) et carte factorielle des individus ($F1 \times F3$).

Principal components analysis of the physical and chemical matrix.

A. Distribution of inertia between the axes (representation of the eigenvalues according to their rank). B. Correlation circle of the variables ($F1 \times F2$) and factorial map of the samples ($F1 \times F2$). C. Correlation circle of the variables ($F1 \times F3$) and factorial map of the samples ($F1 \times F3$).

périodes de fortes eaux et action plus lente (réglée par l'ampleur de la communication) en périodes de basses eaux.

Dans ce schéma, de transport plus ou moins lent des substances dissoutes estivales dans le sens Garonne-bras morts relié par l'aval d'une part et, d'autre part, d'apport permanent par convection dans le bras mort connecté à l'amont et à l'aval, le flux des éléments fertilisants devrait conférer une productivité plus forte et plus précoce au RB par rapport à PV et GF. Dans les deux bras morts de PV et GF, la station aval, mieux fertilisée, devrait produire plus que la station amont. Or les taux de chlorophylle *a* et d'oxygène le matin indiquent le contraire. On peut donc retenir que, dans les bras morts étudiés, ce n'est pas l'apport de fertilisants mais la température atteinte en été qui règle la productivité.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé dans le cadre du programme PIREN-CNRS « Garonne ». Les auteurs expriment leur gratitude à Monsieur DEFER responsable des analyses effectuées au laboratoire départemental des eaux de Haute-Garonne.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AGENCE DE L'EAU ADOUR-GARONNE., 1989. Synthèse des usages et de la qualité des eaux de la Garonne. *Rapport*, Délégation de Bassin Adour-Garonne, 46 p.
- AMOROS C., CHESSEL D., 1985. Les peuplements de Cladocères (Crustacés), descripteurs du fonctionnement hydrologique des bras morts fluviaux. *Annls Limnol.*, 21(3), 227-240.
- BEAUDELIN P., 1987. Les méfaits des extractions de galets de Garonne. *Revue Adour-Garonne*, 34, 10-13.
- BELAUD A., BENGEN D., LIM P., 1989. Observations sur la faune de poissons de la moyenne Garonne. *RGPSO*, 60(4), 625-634.
- BELAUD A., BENGEN D., LIM P., 1990. Approche de la structure du peuplement ichthyologique de six bras morts de la Garonne. *Annls. Limnol.*, 26(1), 81-90.
- BOET P., 1987. Les carrières en eau : potentialités productives et gestion piscicole. *Actes du 4e colloque de l'Association Française des Ingénieurs Ecologues*, Bordeaux, 14-16 mai 1987, 79-92.
- CARREL G., 1986. Caractérisation physico-chimique du Haut-Rhône français et de ses annexes : incidences sur la croissance des populations d'alevins. Thèse de doctorat, Univ. Lyon I, 185 p.
- CARREL G., BARTHELEMY D., AUDA Y., CHESSEL D., 1986. Approche graphique de l'Analyse en Composantes Principales normée : utilisation en hydrobiologie. *Acta Oecologica, Oecol. Gener.*, 7(2), 189-203.

- CARREL G., JUGET J., 1987. La Morte du Sauguet, un ancien méandre du Rhône : bilan hydrologique et biogéochimique. *Schweiz Z. Hydrol.*, 49(1), 102-125.
- CASTELLA C., AMOROS C., 1984. Répartition des Characées dans les bras morts du Haut-Rhône et de l'Ain et signification écologique. *Cryptogamie, Algologie*, V, 2-3, 127-139.
- CASTELLA E., 1987. Apport des macroinvertébrés aquatiques au diagnostic écologique des écosystèmes abandonnés par les fleuves. Recherches méthodologiques sur le Haut-Rhône français. Thèse de doctorat, Univ. Lyon I, 229 p.
- COPP G.H., 1987. Le rôle et le fonctionnement des milieux aquatiques du Haut-Rhône français comme sites de reproduction et de nurserie pour les poissons du fleuve. Thèse de doctorat, Univ. Lyon I, 94 p.
- DECAMPS H., MASSIO J.C., DARIOS J.C., 1976. Variations des teneurs en matières minérales et organiques transportées dans une rivière canalisée, le Lot. *Annls. Limnol.*, 12(3), 215-237.
- DECAMPS H., NAIMAN R.J., 1989. L'écologie des fleuves. *La Recherche*, 208, 310-319.
- DIGBY P.G.N., KEMPTON R.A., 1987. *Multivariate analysis of ecological communities* Chapman & Hall Ltd., London, 206 p.
- FORTUNE M., 1988. Usages passés et écologie de la Garonne. Thèse de doctorat, INP Toulouse, 162 p.
- FOUCART T., 1985. *Analyse factorielle. Programmation sur micro-ordinateurs*. Masson, Paris, 234 p.
- FUSTEC E., MARIOTTI A., GRILLO X., SAJUS I., 1990. Nitrate removal by denitrification in alluvial groundwater : role of a former channel. *J Hydrol.* (sous-pressé).
- JACQUET-LABROT C., 1986. Evolution des anciens chenaux du Rhône et de l'Ain. Ecologie rétrospective basée sur les restes de Cladocères. Thèse de doctorat, Univ. Lyon I, 194 p.
- JAMBU M., 1989. *Exploration informatique et statistique des données*. Dunod, Paris, 503 p.
- JUGET J., AMOROS C., GAMULIN D., REYGROBELLET J.L., RICHARDOT M., RICHOUX Ph., ROUX C., 1976. Structure et fonctionnement des écosystèmes du Haut-Rhône français II. Etude hydrologique et écologique de quelques bras morts. Premiers résultats. *Bull. Ecol.*, 7(4), 479-492.
- JUGET J., YI B.J., ROUX C., RICHOUX Ph., RICHARDOT-COULET M., REYGROBELLET J.L., AMOROS C., 1979. Structure et fonctionnement des écosystèmes du Haut-Rhône français. VII. Le complexe hydrographique de la lône des Pêcheurs (un ancien méandre du Rhône). *Schweiz. Z. Hydrol.*, 41(2), 395-417.
- JUGET J., ROUX A.L., 1982. Une lône du Rhône, zone humide en position de lisière dans l'espace et dans le temps. *Bull. Ecol.*, 13(2), 109-124.
- LAMBERT R., LAMI J.J., SENOES F., 1990. La sécheresse de 1989 dans le bassin de la Garonne (à l'amont du Mas d'Agenais). Univ. Toulouse-Mirail et Ministère de l'Environnement, 74 p.
- LEBART L., MORINEAU A., FENELON J.P., 1979. *Traitement des données statistiques*. Dunod, Paris, 240 p.
- LEGENDRE L., LEGENDRE P., 1979. *Ecologie numérique. Tome 2 : la structure des données écologiques*. Masson, Paris et la Presse de l'Université du Québec, 254 p.
- MARKER A.F.H., NUSH E.A., RIEMANN B., 1980. The measurements of photosynthetic pigments in freshwater and standardization of methods : Conclusions and considerations. *Ergeb. Limnol.*, 14, 91-106.
- NISBET M., VERNEAUX J., 1970. Composantes chimiques des eaux courantes. Discussion et proposition de classes en tant que bases d'interrelation des analyses chimiques. *Annls. Limnol.*, 6(2), 161-190.
- NTAC, 1964. *Water quality criteria*. FWPCA, Washington DC, 234 p.
- PEGAZ-MAUCET D., 1980. Impact d'une perturbation d'origine organique sur la dérive des macro-invertébrés d'un cours d'eau. Comparaison avec le benthos. Thèse de 3e cycle, Univ. Claude-Bernard Lyon I, 130 p.
- PENMAN H.L., 1956. Evaporation : an introductory survey. *Neth. J. Agric. Sci.*, 4(1), 9-29.
- PROBST J.L., 1983. Hydrologie du bassin de la Garonne : modèle de mélanges. Bilan de l'érosion. Exportation des phosphates

- et des nitrates. Thèse de 3e cycle, Univ. Paul-Sabatier Toulouse III, 148 p.
- SNEDECOR G.W., COCHRAN W.G., 1980. *Statistical methods*. Iowa State University Press, Ames, Iowa, 507 p.
- VESPINI F., LEGIER P., CHAMPEAU A., 1987. Ecologie d'une rivière non aménagée des Alpes du Sud : Le Buëch (France). I. Evolution longitudinale des descripteurs physiques et chimiques. *Annls. Limnol.*, 23(2), 151-164.
- ZAR J.H., 1984. *Biostatistical analysis*. Prentice-Hall Internat. Ltd., London, 718 p.